



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑳ Aktenzeichen: 195 09 177.9  
㉔ Anmeldetag: 14. 3. 95  
㉕ Offenlegungstag: 19. 9. 96

DE 195 09 177 A 1

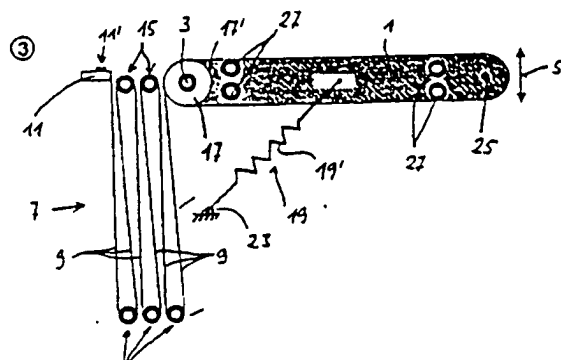
㉑ Anmelder:  
Ziegler, Wolfgang, Prof. Dr.-Ing., 40476 Düsseldorf,  
DE

㉒ Vertreter:  
S. Andrae und Kollegen, 81541 München

㉓ Erfinder:  
Ziegler, Wolfgang, Prof. Dr.-Ing., 40476 Düsseldorf,  
DE; Stelzer, Joachim, 40549 Düsseldorf, DE

⑤④ Verfahren und Vorrichtung zur positionsgeregelten Aktorik-Bewegung

⑤⑦ Ein verbessertes Verfahren und eine verbesserte Vorrichtung zur Durchführung von Bewegungen, beispielsweise bei Robotern, umfaßt eine Antriebs- und Verstelleinrichtung (7), die aus zumindest einem auf Zug und/oder Torsion beanspruchten Draht (9) besteht, der bevorzugt aus einer Legierung mit Formgedächtniseffekt gebildet ist. Durch eine thermisch bedingte Form- und/oder Längenänderung ist die Verstellbewegung der Aktorik möglich. Besonders bevorzugt kann das zumindest eine Stellglied (9) gleichzeitig auch als Meßwiderstand verwendet werden, um darüber die Lage- und Positionsveränderung der hierüber betätigten Aktorik zu bestimmen.



DE 195 09 177 A 1

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Durchführung von Bewegungen, z. B. bei Roboterachsen.

Derartige Antriebssysteme umfaßten bisher in der Regel rotierende Motoren. Zur Positionsbestimmung wurden in der Regel Winkelmeßgeber eingesetzt.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, insbesondere Aktorik-Systeme zu schaffen, die demgegenüber einfacher aufgebaut sind. In einer bevorzugten Ausführungsform sollen dabei gegenüber herkömmlichen Lösungen deutlich vereinfachte Antriebssysteme und/oder Positionsmeßeinrichtungen eingesetzt werden.

Die Erfindung wird bezüglich des Verfahrens entsprechend den im Anspruch 1 bzw. 7 und bezüglich der Vorrichtung entsprechend den im Anspruch 12 bzw. 18 angegebenen Merkmalen gelöst.

Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben.

Es muß als ausgesprochen überraschend bezeichnet werden, daß nunmehr erstmals ein Antriebssystem vorgeschlagen wird, welches insbesondere auch zur Ansteuerung von Roboterachsen eingesetzt werden kann, welches motorlos arbeitet. Ergänzend und alternativ dazu muß auch die erfindungsgemäße Positionsgeber-Einrichtung im Hinblick auf ihre Funktionsweise als höchst überraschend bezeichnet werden, vor allem im Zusammenhang mit der erfindungsgemäßen Antriebseinrichtung.

Gemäß der Erfindung werden zur entsprechenden Umsetzung weder Motoren noch Winkelmesser benötigt.

Die mechanische Energie kommt vielmehr aus der Formänderung von Metallegierungen mit Formgedächtniseffekt, die durch Temperaturänderung erzwungen werden kann. Die Formgedächtnis-Metallegierungen bewegen einen Teil der Aktorik.

Dabei können Formgedächtnis-Metallegierungen, also sog. Memory-Elemente eingesetzt werden, die einen Einweg- oder einen Zweivegeeffekt aufweisen. Bei Materialien mit Einvegeeffekt ist dann zur Erzielung einer vollständigen Hysterese, bestehend aus Aufheizungs- und Abkühlungsphase des Materials, eine entsprechende Federeinrichtung vorgesehen, um die Antriebseinrichtung wieder auf die ursprüngliche Länge nach Durchführung eines Aufheiz- und Durchführung eines nachfolgenden Abkühlungsschrittes wieder zurückzuführen.

Die Aufheizung dieser Memory-Elemente bevorzugt in Form von Drähten kann direkt oder indirekt erfolgen.

Bevorzugt werden ein oder mehrere parallel verlegte Drähte bestehend aus Metallegierung mit Formgedächtniseffekt mittels strombedingter Joulescher Wärme erwärmt, worüber sie sich verkürzen und z. B. einen Aktorikarm eines Roboters bewegen.

Nach Abschaltung des Stroms setzt automatisch die Kühlung ein, die entsprechend der Materialdicke des gewählten Drahtes in einer Größenordnung von beispielsweise 1 Sekunde oder deutlich darunter durchführbar ist, insbesondere dann, wenn Drähte mit dünnem Materialquerschnitt verwendet werden.

Es können aber auch noch zusätzliche Kühleinrichtungen vorgesehen sein, beispielsweise zumindest während der Kühlphase zuschaltbare Lüfter, um die Kühlung und damit die dadurch bewirkte Längenzunahme in noch kürzerer Zeit zu bewirken.

Als besonders überraschend hat sich gezeigt, daß eine Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von der

Effektgröße (also der temperaturbedingten Längenänderung der aus einer Metallegierung mit Formgedächtniseffekt bestehenden Antriebseinrichtung insbesondere in Form eines oder mehrerer Drähte) für die Aufheiz- und Abkühlphase nahezu linear ist. Dadurch läßt sich eine Zuordnung "Widerstand-Effektgröße" im Anwendungsfall relativ einfach bestimmen. Mit anderen Worten kann die jeweilige Aktorik-Position allein dadurch detektiert werden, daß die quantitativ meßbare Widerstandsänderung der Formgedächtnis-Legierung gemessen wird.

Bevorzugt kann die Messung in einem Multiplex-Meßverfahren durchgeführt werden, bei welchem in kurzen Pausen, in denen kein Strom zugeführt wird, der Drahtwiderstand gemessen wird, der, wie erwähnt, ein relatives Maß für die Position bzw. die Positionsänderung des über den betreffenden Draht bewegten Teiles ist.

In einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist vorgesehen, daß entsprechend der zu erzeugenden Kräfte und Momente mehrere derartiger Antriebselemente in Form von Memory-Legierungen (insbesondere in Form von Drähten) parallel angeordnet sind, um dadurch eine Summenwirkung mit größerer Kraft- und Momentenerzeugung zu gewährleisten.

Schließlich ist in einer Weiterbildung der Erfindung ebenso vorgesehen, daß derartige Antriebselemente insbesondere in Form von Drähten bestehend aus Memory-Legierungen an Umlenkstellen (bevorzugt über Rollen) zumindest einmal, bevorzugt mehrfach umgelegt sind, um dadurch in quantitativer (absoluter) Hinsicht größere Längenänderungen und dadurch größere absolute Bewegungsabläufe (beispielsweise Winkelverschwenkungen eines Roboterarmes etc.) durchführen zu können.

Die Erfindung kann aber bevorzugt nicht nur im Sinne von Zugdrähten, sondern auch beispielsweise bei Torsionsdrähten eingesetzt werden, die aus einer Memory-Legierung hergestellt sind. Wärmeabhängig wird dort eine Drehung durch den Torsionsdraht bewirkt.

Weitere Vorteile, Einzelheiten und Merkmale der Erfindung ergeben sich nachfolgend aus den anhand von Zeichnungen dargestellten Beispielen. Dabei zeigen im einzelnen:

Fig. 1 ein schematisches Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Anwendung zur Betätigung eines einzelnen Roboterarmes;

Fig. 2 eine Hysterese zur Erläuterung der veränderten Effektgröße gegenüber der Temperatur (welche weitgehend tibereinstimmt mit einer entsprechenden Kurve bezüglich des sich ändernden elektrischen Widerstandes über der Temperatur);

Fig. 3 ein Diagramm bezüglich der Effektgröße über den Widerstand;

Fig. 4 ein Schema eines Regelkreises;

Fig. 5 eine Zeitmultiplex-Darstellung der Widerstandserfassung.

Im Rahmen der Erfindung werden Materialien eingesetzt, die sog. "Memory-Legierungen" betreffen, also Materialien mit einem Formgedächtniseffekt.

Der Formgedächtniseffekt von Memory-Legierungen bewirkt eine Form- oder Volumenänderung des Werkstoffes bei Änderung seiner Temperatur mit oder ohne Einwirkung äußerer mechanischer Spannungen und basiert auf einer martensitischen Umwandlung.

Der nutzbare Effekt liegt je nach Legierung und Zusammensetzung zwischen 1 und 7%.

Industriell nutzbare Legierungen sind z. B.:

- CuAlNi (Kupfer-Aluminium-Nickel, 1...6%)
- CuZnAl (Kupfer-Zink-Aluminium, 1...4%)
- NiTi (Nickel-Titan, 1...7%).

NiTi überragt im Vergleich zu den genannten Kupferlegierungen in seinen physikalischen und mechanischen Eigenschaften und kommt in den häufigsten Applikationen zur Anwendung.

Memory-Elemente weisen je nach Art der Herstellung drei unterschiedliche Effekte auf, welche bei mechanischer oder thermischer Beanspruchung unterschiedliche Eigenschaften aufweisen und die Grundlage für das jeweilige Anwendungsgebiet darstellen.

Die drei Effekte lassen sich wie folgt beschreiben:

#### — Einwegeffekt

Memory-Elemente mit Einwegeffekt weisen eine Kaltverformbarkeit (plastisches Verhalten) auf, welche durch eine Erwärmung wieder rückgängig gemacht werden kann. Nach erneuter Abkühlung sind die Elemente wiederum kaltverformbar.

#### — Zweiwegeffekt

Der Zweiwegeffekt bewirkt allein durch eine Temperaturänderung eine Bewegung ( $\sigma = 0$ ) oder eine Kraft ( $\varepsilon = 0$ ) und zeichnet sich im Vergleich zum Einwegeffekt durch eine wesentlich kleinere Effektgröße aus.

#### — Pseudoelastizität

Pseudoelastische Memory-Elemente zeichnen sich durch ein gummiartiges Verhalten mit großen Verformungswegen bei gleichzeitig geringer mechanischer Spannung aus.

Memory-Elemente lassen sich in allen erdenklichen Formen herstellen. Federn, Zugdrähte, Biegestreifen und Torsionsdrähte gehören zu den häufigsten Anwendungen.

#### Nutzbare Kräfte und Momente:

Kleine Kräfte bei hohen Effektgrößen weisen Memory-Federn auf, große Kräfte bei kleinen Effektgrößen zeigen Memory-Zugdrähte. NiTi-Zugdrähte mit Einwegeffekt erreichen eine nutzbare Zugkraft von 100 N/mm<sup>2</sup>, wobei eine Rückstellkraft von rund einem Drittel der nutzbaren Kraft erforderlich ist, um nach der Abkühlung die Ausgangslage zu erreichen.

#### Temperaturverhalten:

Das Verhalten von Memory-Elementen unterliegt bei Erwärmung und Abkühlung der Hysterese. Handelsübliche Memory-Werkstoffe weisen eine Umwandlungstemperatur von 40 bis 80°C bei einer Hysterese von 20 bis 40 K auf. Eine Erwärmung, und der damit verbundene Effekt, läßt sich nahezu beliebig schnell erreichen, das Abkühlverhalten hingegen ist in großem Maße von dem eingesetzten Querschnitt des Memory-Elementes abhängig.

#### Effektstabilität:

Unter Beachtung physikalischer Grenzwerte, insbesondere für Überhitzung und Überdehnung, kann eine Stabilität von bis zu 106 Temperaturzyklen erreicht werden.

#### Elektrischer Widerstand:

Der elektrische Widerstand von Memory-Legierungen unterliegt im Verlauf eines martensitischen Umwandlungszyklus ebenfalls einer Hysterese, welche in engem Zusammenhang mit der Umwandlung steht. Der spezifische Widerstand von Memory-Legierungen liegt im Bereich von 0,5 bis 1,1  $\Omega \cdot m \cdot 10^{-6}$ .

(Zur Veranschaulichung: Ein NiTi-Draht mit  $l = 1$  m

und  $d = 130 \mu m$  zeigt innerhalb eines Umwandlungszyklus einen Widerstand von ca. 60...80  $\Omega$ ).

Um einen befriedigenden Einsatz von Memory-Elementen zu erreichen, müssen für die physikalischen und mechanischen Eigenschaften Richtwerte eingehalten werden.

Das Arbeitsvermögen und die Effektstabilität unterliegen Alterung und Ermüdung, welche bei Einhaltung der Richtwerte weitestgehend in Grenzen gehalten werden können.

Folgende Richtlinien sind insbesondere zu beachten:

- Einstellung kleiner Effektgrößen bei gewünschter hoher Zyklenanzahl
- Keine Überschreitung der maximal zulässigen mechanischen Spannung
- Keine Überschreitung der maximal zulässigen Temperatur; keine überhöhte Temperatur über einen längeren Zeitraum
- Kein Schweißen oder Löten
- Kein Lackieren oder Beschichten.

Anhand von Fig. 1 ist ein schematisches Ausführungsbeispiel der Erfindung gezeigt.

Darin ist ein Arm 1, beispielsweise ein Arm 1 eines Roboters, dargestellt, welcher um eine Schwenkachse 3 längs der Pfeildarstellung 5 verschwenkbar ist.

Als Antriebs- und Verstelleinrichtung 7 dient im gezeigten Ausführungsbeispiel ein oder mehrere Drähte 9, die aus einer Memory-Legierung, also aus einer Metalllegierung mit Formgedächtniseffekt, gebildet sind.

Im gezeigten Ausführungsbeispiel können beispielsweise zwölf Drähte 9 hintereinanderliegend an einem Fixpunkt 11, d. h. beispielsweise einem Klemmanschluß 11', befestigt sein. Zur Erzielung einer ausreichenden absoluten Längenänderung sind die mehreren parallel geführten und hintereinanderliegenden Drähte im gezeigten Ausführungsbeispiel um insgesamt fünf Rollen 15 geführt, die jeweils abwechselnd versetzt zueinander liegen.

Die zum Klemmanschluß 11' gegenüberliegenden Enden der Drähte 9 sind dann um eine größer dimensionierte Rolle 17, deren Durchmesser beispielsweise 15 bis 20 mm beträgt (genauso aber beispielsweise auch 2 bis 50 mm etc. aufweisen kann), gewickelt und an geeigneter Stelle, beispielsweise einem mit der Rolle 17 mitdrehenden Klemmanschluß 17' fixiert.

Durch Erwärmung kann nunmehr eine Effektlängenverkürzung durchgeführt werden. Nach nachfolgender Abkühlung kann wiederum eine Längenvergrößerung bewirkt werden.

Bei Verwendung von Zweiwegeffekt-Legierungen wird die Längenverkürzung und bei Abkühlung die nachfolgende Längenvergrößerung der Drähte stets reproduziert, beispielsweise längs einer Hysterese.

Im Falle der Verwendung von Memory-Legierungen mit Einwegeffekt (die in der Regel eine größere Effektgrößen-Veränderung aufweisen) wird bevorzugt ferner noch eine Kraftrückstelleinrichtung 19 verwendet.

Im gezeigten Ausführungsbeispiel besteht diese aus einer Feder 19', die beispielsweise im gezeigten Ausführungsbeispiel mittig am Arm 1 angelenkt und in einem bevorzugten Winkelbereich von  $45^\circ \pm 30^\circ$  davon weglaufen, und zwar in Richtung auf die Schwenkachse 3 zu vorgesehen ist und gegenüberliegend zum Arm 1 an einem Fixpunkt 23 verankert ist.

Der erwähnte Fixpunkt 11 und der Fixpunkt 23 können bei entsprechend optimierter Geometrie als ge-

meinsame Fixpunkte bezüglich der gleichen Basis, also als zusammenhängende oder in fester Relativlage zueinander liegende Fixpunkte gestaltet sein.

Entsprechend dem geschilderten Aufbau können nunmehr mehrgliedrige Arme gebildet sein, wobei jeweils ein nachfolgender Arm an einem in Fig. 1 dargestellten vorausgehenden Arm angelenkt ist, wobei dann der erwähnte Klemmanschluß 11' sowie die aus weiteren Drähten bestehende Antriebs- und Verstelleinrichtung an dem betreffenden vorausgehenden Arm angebracht ist.

Mit anderen Worten könnte ein nächster gelenkiger Arm an der Achse 25 angebracht sein, wobei über die weiteren Rollen 27 auf diesem Arm 25 nächste Memory-Drähte wechselweise hin- und hergeführt werden, die dann auf einer entsprechenden Rolle eines nächsten Arms im Bereich der Achse 25 angreifen.

Durch den geschilderten Aufbau läßt sich eine Effektnutzung von Memory-Zugdrähten beispielsweise in der Robotertechnik erzielen, und zwar in Form einer kompakten Unterbringung großer Drahtlängen.

Kleine Drahtquerschnitte zeigen ein gutes Abkühlverhalten, zeichnen sich jedoch durch kleine Zugkräfte aus; eine parallele Anordnung der erwähnten mehreren Zugdrähte ist zur Erreichung großer Kräfte erforderlich und möglich.

Von daher kann im gezeigten Ausführungsbeispiel problemlos eine Vielzahl, beispielsweise zwölf Drähte, parallel um die Rollen 15 geführt werden.

Als günstig hat sich beispielsweise die Verwendung von NiTi-Zugdrähten mit einem Durchmesser von beispielsweise 130 µm bei einer Wirklänge von beispielsweise 60 cm erwiesen. Die Verwendung derart dünner Drahtquerschnitte ermöglicht kurze Umsteuerungszeiten, d. h. ergibt kurze Abkühlzeiten.

Die Beheizung der Memory-Drahtelemente kann beispielsweise indirekt erfolgen (durch Bestrahlung, externe Beheizung etc.). Bevorzugt wird jedoch die Beheizung mittels Joulescher Wärme, also durch Stromfluß realisiert.

Rechnergestützt kann ein PID-Regler mit Pulsweitenmodulation verwendet werden. Im Multiplexverfahren können Stellgrößen und Abtastgrößen erzeugt und ermittelt werden.

Wie bereits aus Fig. 2 ersichtlich ist, ändert sich die Effektgröße beim Aufheizen und Abkühlen der Memory-Drahtelemente. Beim Aufheizen verringert sich die Effektgröße, die sich beim Abkühlen wiederum vergrößert.

Entsprechend ändert sich auch der Widerstand in Abhängigkeit der Fig. 3, wobei sich eine praktisch gleiche Hysterese wie in Fig. 2 ergibt.

Wie Fig. 3 zeigt, ist aber auch die Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von der Effektgröße für die Aufheiz- und Abkühlphase zumindest nahezu linear. Dadurch ergibt sich eine einfache Zuordnung Widerstand-Effektgröße, um im Einsatzfall die Effektgröße durch Messung und Analyse des elektrischen Widerstandes bestimmen zu können.

Fig. 4 zeigt dabei einen Regelkreis mit einem Vergleich und Regler 31 und einem Memory-Element 9, welches gleichzeitig als Stellglied und auch als Meßglied für die Widerstandsanalyse zur Positionserfassung gilt.

Dem Vergleich und Regler 31 wird ein Sollwert zugeführt, wobei man in der Meßphase über das Memory-Element eine Ausgangsgröße X erhält. Durch die Einheit von Stellglied und Encoder läßt sich damit ein Regelsystem gemäß Fig. 3 als einfaches Zwei-Draht-Sy-

stem im Multiplexbetrieb aufbauen und verwenden.

Fig. 5 zeigt dabei die Multiplexdarstellung zur Widerstandserfassung. Daraus ist ersichtlich, daß in kurzen Pausen, in denen kein Strom zugeführt wird, der Drahtwiderstand gemessen wird, der ein relatives Maß für die Position darstellt.

Dabei wird in der Kühlphase — d. h. also allgemein in der Phase, in der eine Erwärmung nicht stattfindet — durch die eingesetzte Feder 19' (die in der Regel nur bei Memory-Elementen mit Einwegeffekt benötigt werden) sichergestellt, daß am Ende der Abkühlphase das betreffende Memory-Element (hier der Memory-Draht) wieder seine ursprüngliche Ausgangslänge einnimmt und damit der im gezeigten Ausführungsbeispiel verschwenkbare Arm wieder seine Ausgangslage erreicht.

Die spezifische Ausrichtung der Feder kann so gewählt werden, daß eine sich bei zunehmender Verschwenkung verändernde Federkraft, d. h. vor allem eine abnehmende Federkraft-Kennlinie, bei zunehmender Verschwenkung erzeugt wird.

Das beschriebene Beispiel zeigt unter Verwendung von geeigneten Memory-Zugdrähten 9 eine deutliche — nahezu lineare — Relation zwischen elektrischem Widerstand und Längenänderung, auch ohne Einfluß der Temperatur.

Die Deutlichkeit dieser Relation erlaubt die Umsetzung einer Aktorik mit Memory-Zugdrähten bei gleichzeitiger Positionserfassung.

Eine übliche Anordnung Motor-Getriebe-Encoder kann dadurch durch ein einziges Element ersetzt werden.

Die Analyse des elektrischen Widerstandes dient dabei als Feedback zur Ermittlung der Ausgangsgröße im geschlossenen Regelkreis.

Rechnergesteuert kann auch eine digitale Regelung mit variabler Sollwertvorgabe und kontinuierlicher Visualisierung der Regelkenngrößen realisiert werden. Zur Positionierung kann eine Teachfunktion erstellt werden, welche die Datengrundlage für einen automatischen Programmablauf bietet.

Das Ausführungsbeispiel ist anhand von Memory-Zugdrähten beschrieben worden. Gleichzeitig sind aber auch andere Memory-Antriebs- und -Verstelleinrichtungen möglich. Entsprechende motorlose Verstellmöglichkeiten ergeben sich ebenso beispielsweise bei Verwendung von "Torsionsdrähten", die beispielsweise pendelartig in Vertikallage aufgehängt oder längs einer Wegstrecke eingespannt sind, und die in Abhängigkeit einer Temperaturveränderung eine Drehbewegung um ihre Längsachse ausführen. Auch hier kann der Grad der Torsions-Drehbewegung durch Messung des sich während der Torsion verändernden Widerstandes erhalten werden.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Durchführung von Bewegungen, beispielsweise bei Roboterachsen, dadurch gekennzeichnet, daß eine Antriebs- und Verstelleinrichtung (7) verwendet wird, bei welcher die Bewegung einer Aktorik mittels einer thermisch bedingten Form- und/oder Längenänderung eines Stillelementes durchführbar ist.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß eine Antriebs- und Verstelleinrichtung (7) verwendet wird, die aus einem oder mehreren Stillelementen besteht, die aus Legierungen mit Formgedächtniseffekt gebildet sind.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die thermische Form- und/oder Längenänderung mittels Joulescher Wärme erzeugt wird, also durch Stromfluß durch das zumindest eine Stellelement hindurch. 5
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Antriebs- und Verstelleinrichtung (7) aus zumindest einem, vorzugsweise mehreren parallel zueinander verlegten Formgedächtnis-Drähten (9) gebildet ist. 10
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß als Drähte (9) Zugdrähte verwendet werden.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die vorzugsweise in 15 Form von Zugdrähten (9) gebildeten Formgedächtnis-Stellelemente zur Erzielung großer absoluter Längenänderungen mehrfach umgelenkt werden.
7. Verfahren insbesondere nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Antriebs- und Verstelleinrichtung (7) und damit die Stellelemente (9) auch als Widerstands-Meßeinrichtung zur Erfassung der Verstell-Position verwendet wird. 20
8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Messung des Widerstandes in einem Zeitmultiplex-Meßverfahren durchgeführt wird, insbesondere in den die Kühlphase darstellenden Strompausen. 25
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Widerstand des Formgedächtnis-Legierungs-Drahtes (9) gemessen und daraus die Länge des Drahtes (9) und insbesondere die Position einer Aktorik relativ gemessen und geregelt wird. 30
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß als Antriebs- und Verstelleinrichtung (7) Torsionsdrähte (9) mit Formgedächtniseffekt verwendet werden. 35
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß in der Kühlphase aktiv betreibbare Kühlelemente, insbesondere Ventilatoren, zugeschaltet werden. 40
12. Vorrichtung zur Durchführung von Bewegungen, beispielsweise bei Roboterachsen, dadurch gekennzeichnet, daß eine Antriebs-Verstelleinrichtung (7) vorgesehen ist, bei welcher die Bewegung einer Aktorik mittels einer thermisch bedingten Form- und/oder Längenänderung eines Stellelementes durchführbar ist. 45
13. Vorrichtung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Antriebs- und Verstelleinrichtung (7) ein oder mehrere Stellelemente umfaßt, die aus Legierungen mit Formgedächtniseffekt gebildet sind. 50
14. Vorrichtung nach Anspruch 12 oder 13, dadurch gekennzeichnet, daß die thermische Form- und/oder Längenänderung der Stellelemente mittels Joulescher Wärme, d. h. durch Stromfluß durch die Stellelemente hindurch erzeugbar ist. 55
15. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Antriebs- und Verstelleinrichtung (7) zumindest einen, vorzugsweise mehrere, parallel zueinander verlegte Formgedächtnis-Drähte (9) umfaßt. 60
16. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß als Drähte (9) Zugdrähte verwendet werden. 65

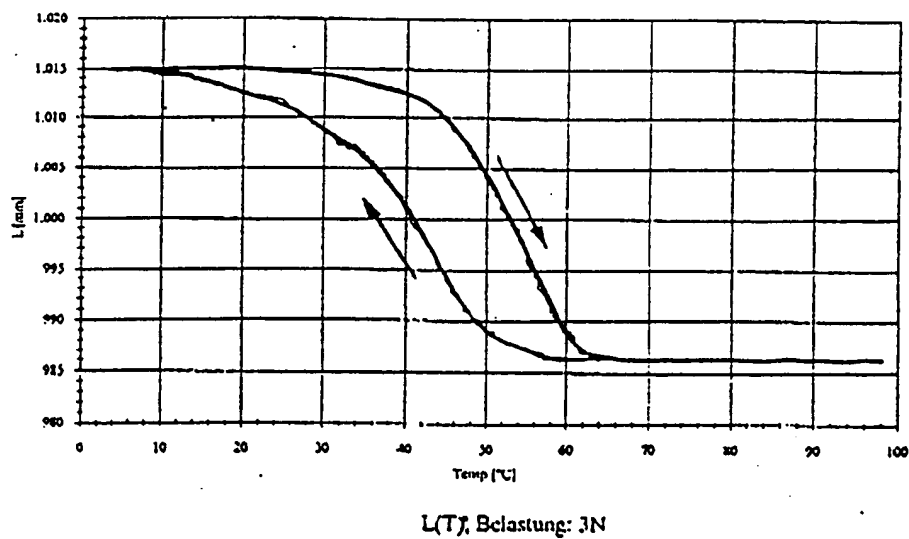
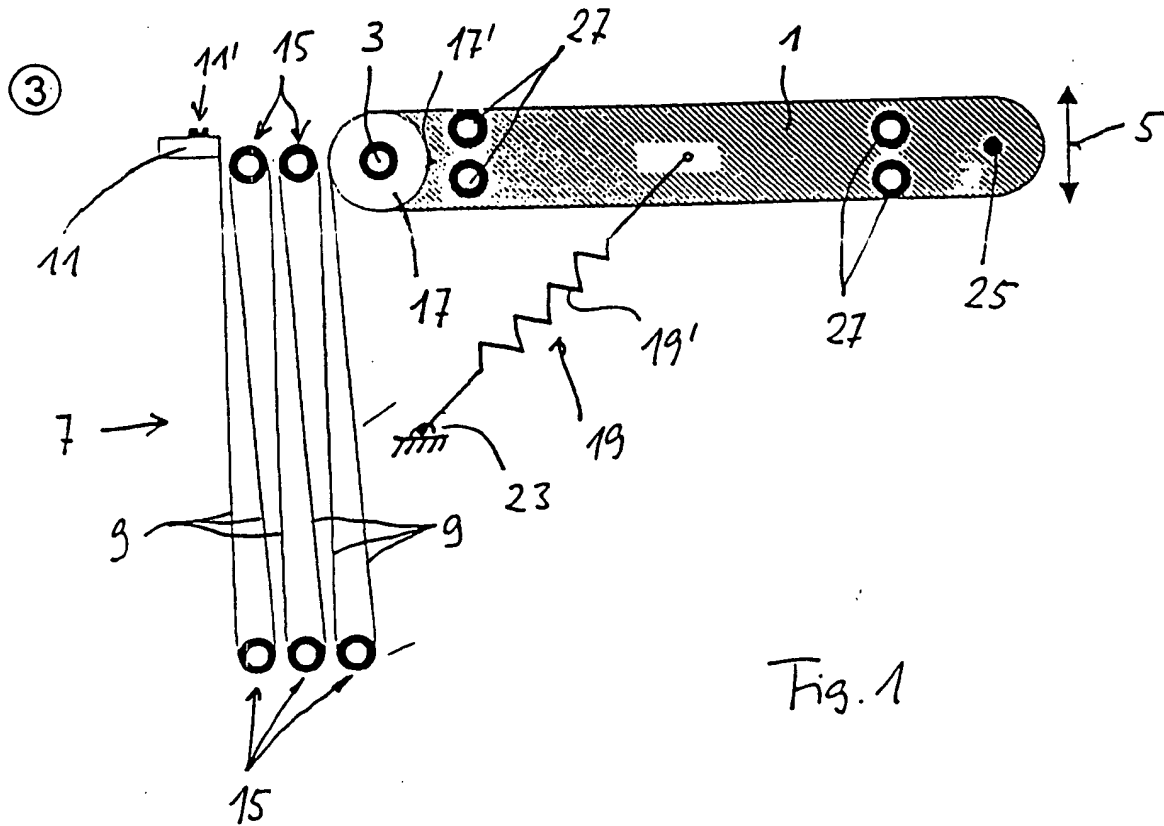
17. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 16, dadurch, daß die vorzugsweise in Form von Zugdrähten (9) gebildeten Formgedächtnis-Stellelemente zur Erzielung großer absoluter Längenänderungen auf vergleichsweise geringem Raum über mehrere Umlenkstellen umgelenkt sind.
18. Vorrichtung insbesondere nach einem der Ansprüche 12 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Antriebs- und Verstelleinrichtung (7) und damit die Stellelemente (9) eine Widerstandsstrecke zur Bildung einer Widerstands-Meßeinrichtung zur Erfassung der Verstell-Positionen einer über die Stellelemente (9) betätigten Aktorik bilden.
19. Vorrichtung nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß eine Zeitmultiplex-Meßeinrichtung vorgesehen ist, worüber der Widerstand des zumindest einen Stellelementes (9) insbesondere in den die Kühlphase bildenden stromlosen Pausen meßbar ist.
20. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß eine Meßeinrichtung zur Messung des Widerstandes des zumindest einen Formgedächtnis-Legierungs-Drahtes (9) vorgesehen ist, worüber die Länge des zumindest einen Drahtes (9) und insbesondere die Position einer darüber betätigten Aktorik relativ meß- und regelbar ist.
21. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 20, dadurch gekennzeichnet, daß die Antriebs- und Verstelleinrichtung (7) Torsionsdrähte (9) mit Formgedächtniseffekt umfaßt.

---

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

---

- Leerseite -



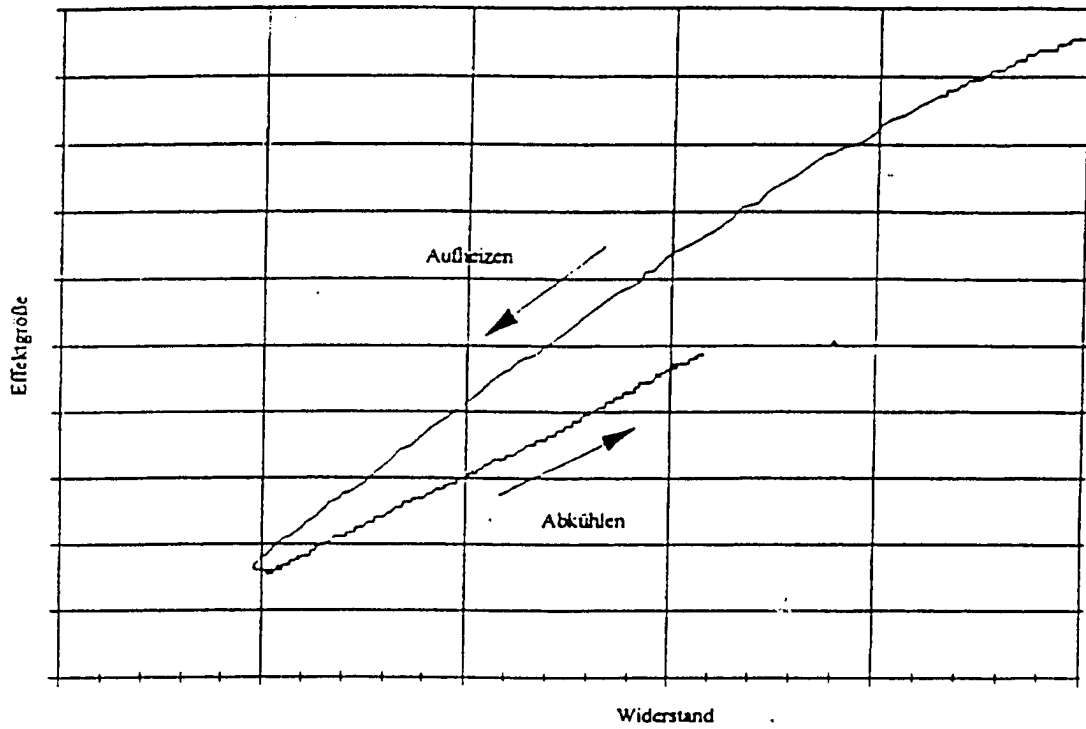


Fig. 3

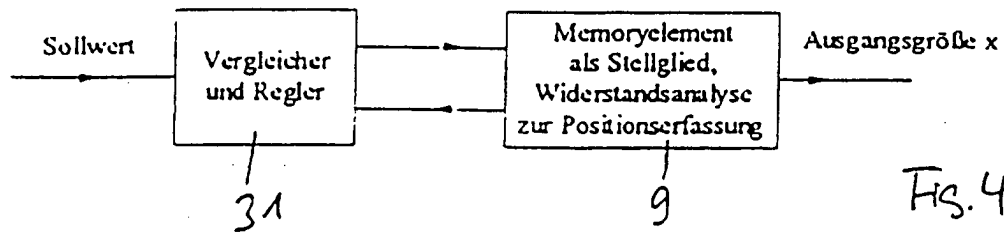


Fig. 4

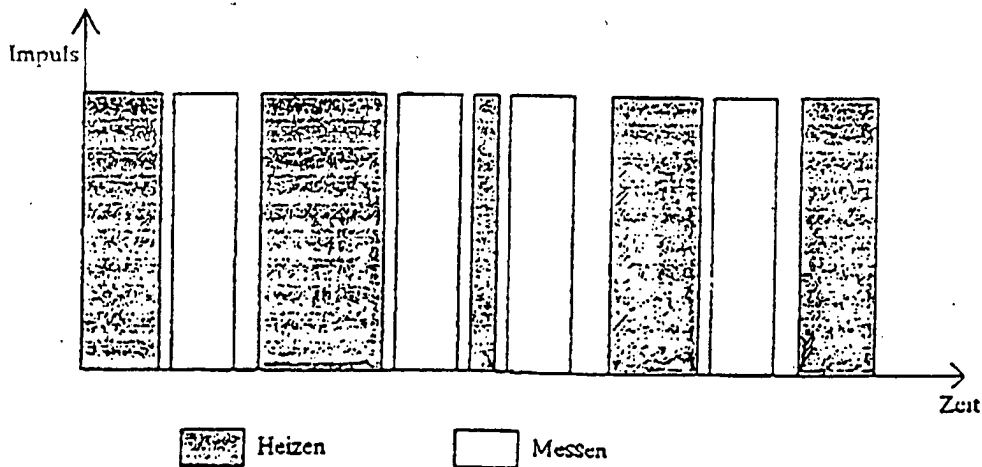


Fig. 5



- (19) Federal Republic of Germany - German Patent Office
- (12) DISCLOSURE
- (10) DE 195 09 177 A1
- (51) Int. Cl.<sup>5</sup>:                    G 12 B 1/00  
                                  G 01 K 7/16  
                                  G 01 B 21/02  
                                  // B 25 J 17/00, 18/00
- (21) File No.:            195 09 177.9
- (22) Filing Date:            14 March 95
- (43) Disclosure Date:    19 September 96
- (71) Claimant: Ziegler, Wolfgang, Prof. Dr.-Ing., 40476 Düsseldorf,  
DE
- (72) Inventor: Ziegler, Wolfgang, Prof. Dr.-Ing., 40476 Düsseldorf,  
DE;  
                                  Stelzer, Joachim, 40549 Düsseldorf, DE
- (74) Representative: A. Andrae and Colleagues, 81541 München
- (54) Process and Device for Position-Controlled Motion of the  
Action Mechanism
- (57) An improved process and an improved device for the performance  
of motions, e.g. with robots, includes a drive and adjustment  
device (7) that consists of at least one wire (9) subjected to  
a tensile and/or torsional load that is made with preference  
of an alloy with a shape memory effect. An adjusting motion of  
the action mechanism is made possible by a thermally induced  
change of shape and/or length. It offers special advantages if  
at least the one control element (9) is used simultaneously as  
a measuring resistor for the purpose of determining the change  
of location and position of the action mechanism that was  
actuated by it.

The following information is taken from the documentation submitted  
by the claimant.

## Description

The invention concerns a process and a device for performing motions, e.g. with axes of robots.

In the past, such drive systems usually included rotating motors. As a rule, angle-measuring sensors were used to determine the position.

This invention addresses the problem of creating an action mechanism system of a comparatively simpler design. In a preferred design variant, drive systems and/or position measuring devices are to be used that have a distinctly simpler design than conventional solutions.

Regarding the process, the invention solves the problem with the characteristic features specified in Claim 1 and Claim 7, respectively, and -- regarding the device -- with those specified in Claim 12 and Claim 18, respectively.

Advantageous design variants of the invention are described in the subclaims.

It must be considered as a highly surprising development that now, for the first time, a drive system is proposed that works without motors and can be used to control the axes of robots. In addition, the position sensing device proposed by the invention must also be regarded as a most surprising development in terms of its functional principle, especially in combination with the drive system proposed by the invention.

According to the invention, neither motors nor angle measuring sensors are needed.

Instead, the mechanical energy is produced by the change of shape of metal alloys with shape memory effect that can be forced by temperature changes. The memory alloys move part of the action mechanism.

For this purpose, metal alloys with a shape memory effect can be used, i.e. so-called memory elements, having a one-way or a two-way effect. In the case of materials with a one-way effect, in order to achieve a complete hysteresis consisting of a heating and a cooling phase of the material, an appropriate spring device is provided to return the drive system to its original length once the heating and subsequent cooling steps have been completed.

Such memory elements, preferably in the form of wires, may be heated either directly or indirectly.

In a preferred design, one or several parallel wires consisting of a memory alloy are heated with the Joule effect of electrical current which causes them to shorten, and thereby move, for example, an arm of the action system of a robot.

When the current is switched off, cooling begins automatically and can be controlled within a magnitude of 1 second, for example, or significantly less by the appropriate selection of the material thickness, especially when wires with a thin material cross-section are used.

However, it is also possible to use auxiliary cooling systems, such as fans that can be activated at least during the cooling phase in order to accomplish the cooling of the materials, and therefore the length increase caused by that, in an even shorter time.

It was found to be especially surprising that the relationship between the electrical resistance and the magnitude of the effect (i.e. the temperature-related length change of a drive system consisting of memory alloy, specifically in the form of one or several wires) is almost linear for the heating and the cooling phase. Thus, it is relatively easy to determine the correlation "resistance - magnitude of effect" in actual applications. In other words, the current position of the action system can be detected simply by measuring the quantitatively measurable change of resistance of the memory alloy.

Preferably, this measurement is accomplished with a multiplex process where the wire resistance is measured during the brief pauses when no current is being supplied, with said resistance being -- as explained -- a relative measure for the position, or change of position, of the component being moved by the wire in question.

In an especially preferred design variant, and as required by the forces and moments to be generated, several such drive elements in the form of memory alloys (wires, in particular) are employed in a parallel configuration in order to ensure the generation of greater forces and moments due to their cumulative effect.

Finally, a further variant of the invention proposes that such drive elements -- especially in the form of wires consisting of memory alloys -- are deflected at deflecting points (preferably rolls) at least once, preferably several times in order to be able to produce, in quantitative (i.e. absolute) terms, greater length changes which will mean larger absolute motion processes (such as angular tilting of a robot arm).

However, preferred uses of the invention include not only tension wires, but also torsion wires made of a memory alloy. Depending on the temperature, the torsion wire causes a rotating

motion.

Additional advantages, details, and characteristics of the invention are given in the examples below that are illustrated by the drawings:

Fig. 1 shows a schematic representation of a design variant of an application based on the invention that serves to actuate a single robot arm.

Fig. 2 shows a hysteresis to explain the change in the magnitude of the effect relative to the temperature (which largely agrees with the corresponding curve showing the change of electrical resistance relative to the temperature).

Fig. 3 shows a diagram of the magnitude of the effect in relation to the resistance.

Fig. 4 shows a schematic of a control circuit.

Fig. 5 shows a time-multiplex illustration of resistance measurement.

The invention makes use of materials consisting of memory alloys, i.e. materials with a shape memory effect.

The shape memory effect of memory alloys causes a change of the shape or the volume of the material when its temperature is changed, with or without the influence of external mechanical tensions, and is based on a martensitic transformation.

The usable effect ranges from 1% to 7%, depending on the alloy and its composition.

The following are examples of industrially usable alloys:

- CuAlNi (copper - aluminum - nickel, 1 ... 6%)
- CuZnAl (copper - zinc - aluminum, 1 ... 4%)
- NiTi (nickel - titanium, 1 ... 7%).

Compared to the listed copper alloys, NiTi excels in terms of its physical and mechanical properties and is used in most applications.

Depending on their manufacture, memory elements show three different effects which have different characteristics under mechanical and thermal loads and provide the criteria for specific applications. The three effects can be described as follows:

- One-way effect

Memory elements with one-way effect can be cold-formed (plastic behavior), and this deformation can be reversed by heating. After cooling, the elements can be cold-formed again.

- Two-way effect

Due to a temperature change alone, the two-way effect produces a motion ( $\sigma = 0$ ) or a force ( $\epsilon = 0$ ); compared to the one-way effect, the magnitude of its effect is significantly smaller.

- Pseudoelasticity

Pseudoelastic memory elements are distinguished by a rubber-like behavior with long deformation paths and low mechanical tension at the same time.

Memory elements can be made in all shapes imaginable. The most frequent applications include springs, tension wires, bending strips, and torsion wires.

Usable forces and moments:

Memory springs offer small forces with high magnitudes of effect, memory tension wires offer large forces with small magnitudes of effect. NiTi tension wires with one-way effect offer a usable tensile force of up to  $100 \text{ N/mm}^2$ , with a return force of approximately one third of the usable force being necessary to reach the starting position after cooling.

Thermal behavior:

During heating or cooling, the behavior of memory elements is subject to hysteresis. Commercial memory materials have an equilibrium temperature of  $40$  to  $80^\circ\text{C}$  with a hysteresis of  $20$  to  $40 \text{ K}$ . While their heating, and therefore the desired effect, can be accomplished very quickly, the cooling behavior depends largely on the cross-section of the memory element in question.

Effect stability:

When physical limits are observed, in particular those for overheating and overstretching, a stability of up to  $10^6$  temperature cycles can be achieved.

Electrical resistance:

In the course of a martensitic transformation, the electrical resistance of memory alloys is also subject to a hysteresis which is closely related to the transformation. The specific resistance of memory alloys has a range from  $0.5$  to  $1.1 \text{ Ohms} \times \text{m} \times 10^{-6}$ . (For example: a NiTi wire with  $l = 1 \text{ m}$  and  $d = 130 \mu\text{m}$  shows a resistance of approximately  $60 \dots 80 \text{ Ohms}$  during a transformation cycle).

In order to employ memory elements with satisfactory results, certain standards for the physical and mechanical properties must be observed.

The performance capability and the stability of the effect are subject to aging and fatigue which can be kept largely within limits when the standards are observed.

The following guidelines in particular should be observed:

- selection of small magnitudes of the effect when a high frequency of cycles is desired
- the maximum permissible mechanical tension must not be exceeded
- the maximum permissible temperature must not be exceeded; no high temperatures over longer periods
- no welding or soldering
- no painting or coating.

Fig. 1 shows the schematic representation of a variant of the invention. It shows the arm 1, e.g. the arm 1 of a robot, which pivots around a pivot axis 3 in the directions indicated by the arrow 3.

In this variant, one or several wires 9 made of a memory alloy, i.e. a metal alloy with a shape memory effect, serve as drive and adjusting device 7.

In the variant shown here, twelve wires 9, for example, may be attached one next to the other to a fixed point 11, such as a clamp connection 11'. In order to achieve a sufficient absolute length change, the multiple parallel wires in this variant are guided around a total of five rolls 15 that are alternately staggered in relation to each other.

The ends of the wires 9 that are opposite the clamp connection 11' are then wound around a larger roll 17 with a diameter of 15 to 20 mm, for example (although it may just as well be 2 to 50 mm) and held by a suitable device, as, for example, a clamp connection 17' that rotates along with the roll 17.

Now, an effective length shortening can be performed by means of heating. After subsequent cooling, a length increase can be achieved.

When a alloy with two-way effect is used, the length reduction and the subsequent length increase due to the cooling of the wires are always reproduced, along a hysteresis, for example.

If memory alloys with one-way effect are used (which usually

produce larger changes of the magnitude of the effect), a preferred design also incorporates a powered return device 19.

In this example, this device consists of a spring 19' which is attached at the center of arm 1, leading away from it at a preferred angle of  $45^\circ \pm 30^\circ$  in the direction of the pivot axis 3, and is attached to a fixed point 23 opposite the arm 1.

With a suitably optimized geometry, the fixed point 11 and the fixed point 23 may be designed as common fixed points in relation to the same base, i.e. as fixed points that are either connected or have a fixed relative position to each other.

In analogy to the design described above, multilink arms may be used, in which case each consecutive arm is linked to a preceding arm shown in Fig. 1. Now, the clamp connection 11' as well as the drive and adjusting device consisting of additional wires are attached to this preceding arm.

In other words, an additional jointed arm may be attached to the axis 25, with additional memory wires leading back and forth over the rolls 27 on this arm 25, and engaging a corresponding roll of a consecutive arm in the area of the axis 25.

By means of the design described here the effect of memory tension wires can be exploited in robot technology, for example, with a compact arrangement of great wire lengths.

Small wire diameters show a good cooling behavior, but are also characterized by small tensile forces; in order to generate large forces, it is necessary and possible to arrange several tensile wires in a parallel configuration.

In the design variant shown in the figure, a multitude of wires, twelve for example, can be guided in parallel around the rolls 15 without any problems.

For example, the use of NiTi tension wires with a diameter of  $130 \mu\text{m}$ , for example, with an effective length of 60 cm proved to be advantageous. The use of such thin wire diameters makes for short reversing times due to their short cooling times.

The heating of the memory wire elements may be done indirectly, for example (by means of radiation, external heating, etc.). A preferred method, however, consists of heating with the Joule effect, i.e. by means of an electric current.

A PID controller with pulse width modulation can be used in conjunction with a computer. In a multiplex process, controller outputs and sensor values can be generated and determined.

As Fig. 2 shows, the magnitude of the effect changes during

the heating and cooling of the memory wire elements. When heated, the magnitude of the effect decreases, and it increases during the cooling phase.

The resistance also changes accordingly, as shown in Fig. 3, resulting in practically the same hysteresis as in Fig. 2.

However, as shown in Fig. 3, the dependency of the electrical resistance on the magnitude of the effect is at least almost linear for the heating and cooling phase. This means a simple correlation of resistance and magnitude of the effect which makes it possible to determine the magnitude of the effect in an application by measuring and analyzing the electrical resistance.

Fig. 4 shows a control circuit with a comparator and a regulator 31 and a memory element 9 that serves simultaneously as a control element and as a measuring element for a resistance analysis intended to determine the position.

A nominal value is fed into the comparator and regulator 31, and an output value X is produced in the measuring phase via the memory element. Due to the combination of control element and encoder, a control system in accordance with Fig. 3 can be designed and used as a simple two-wire system in multiplex operation.

Fig. 5 shows the multiplex approach to resistance measuring. It can be seen that the wire resistance that is a relative measure of the position is measured during the brief pauses when no current is being supplied.

During the cooling phase -- i.e. generally during the phase when no heating takes place -- the spring 19' (that is usually needed only for memory elements with one-way effect) ensures that, at the end of the cooling phase, the memory element in question (the memory wire in this case) returns to its original length so that the swivelling arm shown in this design variant also returns to its starting position.

The specific alignment of the spring can be selected so that the spring force changes (which means primarily a decreasing spring force characteristic) with increasing swivelling.

The example described here shows a distinct--almost linear--relation between the electrical resistance and the length change, even without the influence of temperature, when suitable memory tension wires 9 are used.

The unequivocal nature of this relation permits the implementation of an action system with memory tension wires and simultaneous detection of the position.

The usual motor-transmission-encoder unit can thus be replaced



by a single element.

The analysis of the electrical resistance serves as feedback for determining the output variable in the closed control circuit.

It is also possible to realize a computer-controlled digital control system with input of variable nominal values and continuous visualization of the control characteristics. For the positioning, a teaching function can be established that would offer the data for an automatic running of the program.

The design example was described in terms of memory tension wires. However, other memory-type drive and adjusting devices are also possible. Similar motorless adjustment possibilities are offered by torsion wires, for example, that may be suspended vertically in pendulum fashion, or may be supported along a path, and produce a rotational motion around their longitudinal axis in dependency on a temperature change. Here, too, the degree of the torsional rotation motion can be determined by measuring the resistance that changes during the torsion process.

#### Patent Claims

1. Process for performing motions, e.g. with robot axes, characterized by the feature that a drive and adjusting device (7) is employed where the motion of the action system can be achieved by means of a thermally induced shape and/or length change of a control element.
2. Process according to Claim 1, characterized by the feature that a drive and adjusting device (7) is employed that consists of one or several control elements made of alloys with a shape memory effect.
3. Process according to Claim 1 or 2, characterized by the feature that the thermal shape and/or length change is produced by the Joule effect, i.e. by the flow of current through at least one control element.
4. Process according to one of the Claims 1 through 3, characterized by the feature that the drive and adjusting device (7) consists of at least one and preferably several memory wires (9) in a parallel configuration.
5. Process according to one of the Claims 1 through 4, characterized by the feature that tension wires are used for the wires (9).
6. Process according to one of the Claims 1 through 5, characterized by the feature that the memory control elements consisting preferably of tension wires (9) are deflected multiple times in order to achieve large absolute length changes.

7. Process according to one of the Claims 1 through 6, characterized by the feature that the drive and adjusting device (7), and therefore also the control elements (9), is also used as a resistance measuring device for detecting the adjustment position.

8. Process according to Claim 7, characterized by the feature that the measurement of the resistance is performed in a time-multiplex process, especially during the breaks without current flow that represent the cooling phases.

9. Process according to one of the Claims 1 through 8, characterized by the feature that the resistance of the wire made of alloy with a shape memory effect (9) is measured, and that this measurement is used for relative measuring and controlling of the length of the wire (9) and, in particular, of the position of an action system.

10. Process according to one of the Claims 1 through 9, characterized by the feature that torsion wires (9) with a shape memory effect are used as drive and adjusting device.

11. Process according to one of the Claims 1 through 10, characterized by the feature that active cooling elements, especially fans, are activated during the cooling phase.

12. Device for performing motions, e.g. with robot axes, characterized by the feature that a drive/adjusting device (7) is provided where the motion of an action system can be produced by means of a thermal shape and/or length change of a control element.

13. Device according to Claim 12, characterized by the feature that the drive and adjusting device (7) includes one or several control elements that are made of alloys with a shape memory effect.

14. Device according to Claim 12 or 13, characterized by the feature that the thermal shape and/or length change of the control elements can be produced by the Joule effect, i.e. by the flow of current through the control elements.

15. Device according to one of the Claims 12 through 14, characterized by the feature that the drive and adjusting device (7) consists of at least one and preferably several memory wires (9) in a parallel configuration.

16. Device according to one of the Claims 1 through 15, characterized by the feature that tension wires are used for the wires (9).

17. Device according to one of the Claims 12 through 16, characterized by the feature that the memory control elements consisting preferably of tension wires (9) are deflected via

multiple deflecting points in order to achieve large absolute length changes in a relatively small space.

18. Device according to one of the Claims 12 through 17, characterized by the feature that the drive and adjusting device (7), and therefore also the control elements (9), form a resistance path that results in a resistance measuring device for detecting the adjustment position of an action system actuated by the control elements (9).

19. Device according to Claim 18, characterized by the feature that a time-multiplex measuring device is provided which permits the measuring of the resistance of at least one control element (9), especially during the pauses without current flow that represent the cooling phases.

20. Device according to one of the Claims 12 through 19, characterized by the feature that a measuring device for measuring the resistance of at least one wire made of alloy with a shape memory effect (9) is provided for relative measuring and controlling of the length of at least one wire (9) and, in particular, of the position of an action system actuated by this wire.

21. Device according to one of the Claims 12 through 20, characterized by the feature that the drive and adjusting device (7) includes torsion wires (9) with a shape memory effect.

Two pages of drawings are included.

Legend for drawings:

Fig. 2

Belastung = load

Fig. 3

Effektgrösse = magnitude of the effect  
Widerstand = resistance  
Aufheizen = heating  
Abkühlen = cooling

Fig. 4

Sollwert = nominal value  
Vergleicher und Regler = comparator and regulator  
Memoryelement .. = memory element as control element,

resistance analysis for detecting position  
Ausgangsgrosse = output value

Fig. 5

Impuls = pulse  
Heizen = heating  
Messen = measuring